

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI

REFERATY PROBLEMOWE

Zeszyt 76

Stanisław Sońta

ŹRÓDŁO JEDNORODNEGO POLA MAGNETYCZNEGO
NISKIEJ CZĘSTOTLIWOŚCI O MAŁYM NATĘŻENIU
ORAZ JEGO POMIAR



Warszawa 1987

532. 672

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI

KOŁO ZAKŁADOWE STOWARZYSZENIA ELEKTRYKÓW POLSKICH

REFERATY PROBLEMOWE

Zeszyt 76

Stanisław Sońta

Źródło jednorodnego pola magnetycznego
niskiej częstotliwości o małym natężeniu
oraz jego pomiar

Warszawa 1987

5-9769

Zespół Redakcyjny:

dr inż. Stanisław Sońta, mgr inż. Andrzej Stągrowski
mgr inż. Krystyna Frączek

Opracował:

dr inż. Stanisław Sońta
Zakład Miernictwa i Automatyzacji Badań /Z-2/

Instytut Łączności
04-894 Warszawa, ul. Szachowa 1, tel. 128-479

Praca własna 5/2-22

Opiniował: dr inż. Krystyn Plewko

Maszynopis dostarczono dnia 1987.05.06

BIBLIOTEKA
Instytut Łączności
Nr 5-9769

W artykule przedstawiono sposób wytwarzania pola magnetycznego niskiej częstotliwości o małym natężeniu. Podano układ generatora takiego pola magnetycznego oraz układ pomiarowy. Omówiono także zastosowanie pola magnetycznego do transmisji sygnałów akustycznych, w szczególności z wykorzystaniem dla ludzi niedosłyszących.

Redaktor: mgr Krystyna Juszkiewicz

Montaż tekstu: tech. Grażyna Woźnica

Wpłynęło do Działu Wydawniczego Instytutu Łączności
w Warszawie, ul. Szachowa 1 dnia 1987.06.10
Nakład 70 egz.

Stanisław Sońta

ŹRÓDŁO JEDNORODNEGO POLA MAGNETYCZNEGO
NISKIEJ CZĘSTOTLIWOŚCI O MAŁYM NATĘŻENIU
ORAZ JEGO POMIAR

SPIS TREŚCI

	Str.
1. Wprowadzenie	1
2. Pole magnetyczne - podstawowe wielkości	3
3. Metody wytwarzania jednorodnego pola magnetycznego	7
3.1. Pole magnetyczne w obszarze obwodu elektrycznego o typowych kształtach geometrycznych	7
3.2. Źródło jednorodnego zmiennego pola magnetycznego	11
4. Pomiar natężenia pola magnetycznego	13
4.1. Sonda pomiarowa	14
4.2. Wzmacniacz pomiarowy	16
4.3. Układ miernika	17
4.3.1. Sonda	17
4.3.2. Wzmacniacz pomiarowy	19
4.3.3. Woltomierz	20
5. Zakończenie	20
Wykaz literatury	21

Stanisław Sołta

ŹRÓDŁO JEDNORODNEGO POLA MAGNETYCZNEGO
NISKIEJ CZĘSTOTLIWOŚCI O MAŁYM NATĘŻENIU
ORAZ JEGO POMIAR

1. WPROWADZENIE

Jednym z parametrów określających cechy przyrządu pomiarowego jest jego odporność na zakłócenia, spowodowane przez zewnętrzne pole elektromagnetyczne. Dotyczy to zarówno odporności na zakłócenia w pasmie częstotliwości akustycznych, jak również w pasmie wielkich częstotliwości. W zakresie częstotliwości akustycznych istotne zakłócenia są powodowane przez pole magnetyczne, stąd najczęściej jest określana odporność urządzenia pomiarowego na zakłócenia wynikające z istnienia pola magnetycznego. Aby dokonać oceny odporności badanego urządzenia na zakłócenia pochodzące od pola magnetycznego, należy badane urządzenie umieścić w jednorodnym zmiennym polu magnetycznym o znanym natężeniu.

Właściwości pola magnetycznego mogą być wykorzystane dla celów użytkowych, np. do przekazywania /przesyłania/ sygnału na drodze bezprzewodowej. Ila to szczególne zastosowanie przy przekazywaniu informacji osobom niedosłyszącym używającym aparatów słuchowych. Jeśli pole magnetyczne na danej przestrzeni jest wytwarzane przez użytkowy sygnał akustyczny, to sygnał ten może być odebrany w tej przestrzeni przez urządzenie odbiorcze, wyposażone w odpowiednią cewkę indukcyjną. Sposób ten stosuje się do transmisji sygnału w tzw. systemach pętli indukcyjnych generujących zmienne pole magnetyczne na określonym obszarze, wytwarzane przez sygnał użyteczny sterujący tą pętlą.

Systemy pętli indukcyjnych mają wiele zastosowań, między innymi w dużych salach konferencyjnych do przekazywania wielojęzycznych tłumaczeń, wyszukiwania osób w budynku, przekazywania rozmowy telefonicznej w danym pomieszczeniu itp. Ten system transmisji sygnałów akustycznych znajduje szczególne zastosowanie przy odbiorze tych sygnałów przez ludzi z uszkodzonym słuchem, którzy korzystają z aparatu słuchowego. Obecnie produkowane aparaty słuchowe dla inwalidów słuchu są wyposażone w urządzenie odbiorcze w postaci cewki indukcyjnej, zwanej "cewką telefoniczną". Cewka ta może być dołączona w aparacie słuchowym w miejsce mikrofonu. Aparat słuchowy ma przełącznik trójpozycyjny, który do wejścia aparatu słuchowego dołącza: mikrofon - pozycja "M", cewkę indukcyjną - pozycja "T" lub jednocześnie mikrofon i cewkę indukcyjną - pozycja "MT". Daje to możliwość odbioru sygnału przez aparat słuchowy w systemie pętli indukcyjnej.

Transmisja sygnału poprzez pętlę indukcyjną daje często jedyną możliwość poprawnego odbioru sygnału w przypadku dużych zakłóceń zewnętrznych w postaci szumów, hałasów, zjawiska ocha itp. Systemy pętli indukcyjnych znajdują szczególne zastosowanie dla osób niedosłyszących w różnych pomieszczeniach takich, jak: szkoła, kino, teatr, muzeum oraz innych miejscach publicznych zgromadzeń, gdzie informacje są przekazywane w sposób bezpośredni. Ten system znalazł szerokie zastosowanie dla inwalidów słuchu przy korzystaniu z różnych urządzeń elektroakustycznych, jak: radio, telewizor, magnetofon, gramofon itp., z których to urządzeń sygnał wyjściowy akustyczny jest podawany na pętlę indukcyjną mieszkaniową lub indywidualną. Pętla indukcyjna znalazła efektywne wykorzystanie w aparacie telefonicznym. Sygnał odbiorczy z telefonu jest podawany na odpowiednią pętlę indukcyjną, co znacznie poprawia skuteczność odbioru sygnałów użytecznych z telefonu przez ludzi niedosłyszących korzystających z aparatu słuchowego.

W celu określenia optymalnych warunków odbioru sygnału w obszarze pętli indukcyjnej zachodzi potrzeba zarówno znor-

malizowania wartości natężenia pola magnetycznego tej pętli, jak również wyznaczenia parametrów cewki odbiorczej [1, 2]. Przy ocenie urządzeń i aparatury telekomunikacyjnej także istnieje konieczność zarówno pomiaru, jak i wytwarzania określonego natężenia pola magnetycznego. Do tego niezbędne jest źródło /generator/ jednorodnego pola magnetycznego o określonym natężeniu oraz miernik natężenia tego pola.

2. POLE MAGNETYCZNE - PODSTAWOWE WIELKOŚCI

Jeśli poruszające się ładunki elektryczne znajdują się w pobliżu przewodu, w którym płynie prąd elektryczny, to na te ładunki działa pewna siła. Zjawisko to świadczy o istnieniu pola magnetycznego w otoczeniu przewodu z prądem. Pole magnetyczne jest związane z ruchem ładunków elektrycznych. Działa ono z pewną siłą na poruszające się ładunki elektryczne w polu magnetycznym. Na przykład, pole magnetyczne działa z pewną siłą na przewód z prądem umieszczonym w tym polu albo na strumień elektronów w lampie elektronowej /np. w kineskopie/. Pole magnetyczne należy traktować jako stan przestrzeni, w której występuje działanie sił na poruszające się ładunki.

Aby można było badać własności pola magnetycznego i przedstawić jego ilościowe zależności, można w każdym punkcie środowiska i w każdej chwili przyporządkować polu magnetycznemu dwa wektory:

- wektor indukcji magnetycznej B oraz
- wektor natężenia pola magnetycznego H .

Między wektorami B i H zachodzi zależność:

$$B = \mu H \quad /1/$$

gdzie: μ jest przenikalnością magnetyczną bezwzględną środowiska.

Wektor indukcji magnetycznej B jest określony ze wzoru na siłę działającą na przewód prądem, umieszczony w polu magnetycznym. Wektor siły F - działającej w polu magnetycznym

równomiernym o indukcji magnetycznej B na przewodnik prostoliniowy o długości wektora l , w którym płynie prąd i - wyraża się iloczynem wektorowym wg zależności 2 i 3, zwanej prawem Laplace'a:

$$\vec{F} = i (\vec{l} \times \vec{B}) \quad /2/$$

Moduł siły wynosi zaś:

$$F = B i l \sin \alpha \quad /3/$$

gdzie: α jest to kąt między wektorem indukcji magnetycznej B i wektorem l .

Do wyznaczenia kierunku siły F , działającej na prostoliniowy przewód lub odcinek przewodu z prądem i , umieszczony w polu magnetycznym o indukcji B , jest stosowana reguła lewej dłoni. Jednostką indukcji magnetycznej w układzie jednostek SI jest tesla T, którą wyznacza wzór:

$$B = \frac{[F]}{[i][l]} = \frac{1N}{1A \cdot 1m} = \frac{1V \cdot 1s}{1m^2} = 1 T /tesla/ \quad /4/$$

Zatem, jeśli siła F jest wyrażona w niutonach N, długość przewodu l w metrach m, prąd i w amperach A, to jednostką indukcji magnetycznej B w układzie jednostek SI jest tesla T. Wymiarem tej jednostki jest $V \cdot s/m^2$. W praktyce spotyka się często jednostkę indukcji magnetycznej w układzie jednostek em CGS, zwaną gausem Gs, przy czym:

$$1 T = 10^4 Gs \quad \text{stad} \quad 1 Gs = 10^{-4} T \quad /5/$$

W wielu zagadnieniach technicznych jako wielkość decydująca występuje strumień wektora \vec{B} , nazywany powszechnie strumieniem magnetycznym ϕ .

Strumień magnetyczny ϕ jest całką powierzchniową wektora indukcji magnetycznej \vec{B} po danej powierzchni S :

$$\phi = \int_S B dS \quad /6/$$

strumień magnetyczny ϕ jest wielkością skalarną.

W równomiernym polu magnetycznym strumień magnetyczny przez powierzchnię S prostopadłą do wektora \vec{B} jest równy iloczynowi modułu wektora \vec{B} i powierzchni S :

$$\phi = B \cdot S \quad /7/$$

Jednostką strumienia magnetycznego w układzie jednostek SI jest voltosekunda V·s, nazwana weberem Wb:

$$\phi = [B] \cdot [S] = \frac{1V \cdot 1s}{1m^2} \cdot 1m^2 = 1V \cdot 1s = 1 Wb /weber/ \quad /8/$$

Między jednostką indukcji magnetycznej i strumienia magnetycznego zachodzi związek:

$$1 T = 1 \frac{Wb}{m^2} \quad /9/$$

W praktyce jest często spotykana jednostka strumienia magnetycznego w układzie jednostek em CGS, zwana makswelem Mx, przy czym:

$$1 Wb = 10^8 Mx \quad \text{lub} \quad 1 Mx = 10^{-8} Wb \quad /10/$$

Bezpośrednią przyczyną powstawania pola magnetycznego jest prąd elektryczny w obwodzie elektrycznym. Stan pola magnetycznego w dowolnym punkcie charakteryzuje wielkość wektora - indukcja magnetyczna. Zależy ona nie tylko od przyczyny wywołującej dane pole /np. od wartości prądu i geometrii jego drogi/, ale także od właściwości magnetycznych środowiska. Wartość prądu i geometria obwodu determinują stan wymuszenia w otaczającym go środowisku jednorodnym niezależnie od właściwości magnetycznych środowiska, a rozkład indukcji magnetycznej w przestrzeni jest odpowiedzią środowiska na dane wymuszenie.

Do opisu pola magnetycznego w wyniku działania prądu elektrycznego w zależności od ukształtowania jego drogi służy wielkość wektorowa - natężenie pola magnetycznego \vec{H} . Dla wyznaczenia natężenia pola magnetycznego można posłużyć się metodą kompensacji pola za pomocą małego próbnego solenoidu,

nawiniętego równomiernie na całej długości l , przy czym stosunek długości solenoidu l do jego średnicy d powinien spełniać warunek $l/d > 10$. Ten próbny solenoid umieszcza się w badanym polu magnetycznym i tak się dobiera ustawienie osi solenoidu oraz wartość prądu I płynącego przez solenoid, aby skompensować całkowite działanie badanego pola magnetycznego [3]. Stosując solenoidy o różnych długościach l i różnych liczbach zwojów N z doświadczenia można wykazać, że kompensacja pola zostaje osiągnięta zawsze przy tym samym kierunku ustawienia osi solenoidu oraz przy tej samej wartości wyrażenia $I \cdot \frac{N}{l}$ solenoidu.

Wielkość $I \cdot \frac{N}{l}$ próbnego solenoidu kompensującego określa się jako moduł natężenia pola H w danym punkcie pola magnetycznego. Zatem:

$$[H] = I \cdot \frac{N}{l} \quad /11/$$

Taki solenoid, w którym płynie prąd, zachowuje się na zewnątrz jak magnes trwały. Biegun N solenoidu stanowi koniec, z którego wychodzą linie pola na zewnątrz, zaś biegun S stanowi koniec przeciwny. Linie pola wewnątrz solenoidu są skierowane od bieguna S do bieguna N. Dla wyznaczenia kierunku linii pola ma zastosowanie reguła śruby prawoskrętnej lub reguła prawej ręki. Indukcja magnetyczna B w osi solenoidu w środku długości osi jest proporcjonalna do natężenia pola, ale zależy od środowiska, tzn. od przenikalności magnetycznej μ środowiska, co wyraża się zależnością:

$$B = \mu I \cdot \frac{N}{l} = \mu H \quad /12/$$

Jednostką natężenia pola magnetycznego w układzie jednostek SI jest amper na metr:

$$[H] = 1 \frac{A}{m} \quad /13/$$

W praktyce często używa się jednostki natężenia pola magnetycznego w układzie jednostek em CGS, zwanej erstedem Oe, przy czym:

$$1 \frac{A}{m} = \frac{4\pi}{10^3} \text{ Oe} = 12.56 \cdot 10^{-3} \text{ Oe} \quad /14/$$

lub

$$1 \text{ Oe} = \frac{10^3}{4\pi} \frac{A}{m} \approx 79.6 \frac{A}{m} \quad /15/$$

3. METODY WYTWARZANIA JEDNORODNEGO POLA MAGNETYCZNEGO

Metoda badań urządzeń telekomunikacyjnych, a w szczególności aparatury pomiarowej na odporność od zakłóceń pól magnetycznych wymaga umieszczenia tych urządzeń w jednorodnym zmiennym polu magnetycznym o znanej częstotliwości i o znanym natężeniu tego pola. Podobnie badania urządzeń elektroakustycznych, np. aparatu słuchowego na odbiór sygnału użytecznego w polu magnetycznym, również wymagają źródła o jednorodnym zmiennym polu magnetycznym. Jednorodne pole magnetyczne jest to pole, które w określonej przestrzeni wykazuje stałe natężenie, stały kierunek i stały zwrot. Takie pole można wytworzyć w określonym obszarze obwodu z prądem elektrycznym, uwzględniając geometrię tego obwodu.

3.1. Pole magnetyczne w obszarze obwodu elektrycznego o typowych kształtach geometrycznych

W zagadnieniach praktycznych jednym z podstawowych zagadnień jest poszukiwanie rozkładu pola magnetycznego przy znanym rozkładzie prądów w rozpatrywanym obszarze oraz geometrii tego obszaru. Natężenie pola bądź indukcję magnetyczną danego obwodu elektrycznego można wyliczyć z prawa Biota-Savarta [4] w odniesieniu do elementarnego obwodu, jakim jest przewód z prądem. W praktyce najczęściej spotykanymi kształtami obwodów elektrycznych są:

a/ Płaski zwoj kołowy oraz płaska pętla kwadratowa

Natężenie pola magnetycznego w obszarze płaskiego zwoju kołowego, zgodnie ze wzorem Laplace'a [3], wynosi:

$$H = \frac{1}{4\pi} \int d l \frac{\sin \alpha}{r^2} \quad /16/$$

natomiast w środku zwoju, to znaczy dla promienia $r = \text{const.}$ i $\alpha = 90^\circ$, wynosi ono:

$$H = \frac{1}{4\pi r^2} \int d l = \frac{1}{4\pi r^2} 2\pi r = \frac{1}{2r} \left[\frac{\Lambda}{m} \right] \quad /17/$$

gdzie: l - prąd płynący przez zwoj w Λ , r - promień zwoju wyrażony w m.

Zależność ta jest słuszna przy założeniu, że promień zwoju jest znacznie większy od promienia przewodu φ tworzącego zwoj, to znaczy $r/\varphi \gg 1$.

Podobnie można rozpatrzyć zwoj w kształcie pętli kwadratowej o boku a w metrach. Natężenie pola magnetycznego wewnątrz /w środku/ takiej pętli wynosi:

$$H = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{a} \left[\frac{\Lambda}{m} \right] \quad /18/$$

Dla pętli o pojedynczym zwoju, by uzyskać odpowiednie natężenie pola, jest wymagany przepływ odpowiednio dużego prądu. Dlatego w praktyce stosuje się pętlę o odpowiednio dużej liczbie zwojów w postaci np. solenoidu lub cewki o określonym kształcie.

b/ Solenoid - cewka w postaci walca

Dla solenoidu o długości l , liczbie zwojów n oraz średnicy d , przy warunku, że $l/d \gg 1$, natężenie pola magnetycznego wewnątrz solenoidu wzdłuż jego osi wynosi:

$$H = \frac{1 \cdot n}{l} \left[\frac{\Lambda}{m} \right] \quad /19/$$

W przypadku bardzo krótkiego solenoidu, kiedy średnica solenoidu jest znacznie większa od jego długości, tzn. $d/l \gg 1$, natężenie pola w środku tej krótkiej cewki - solenoidu, wzdłuż osi wynosi w przybliżeniu:

$$H = \frac{I \cdot n}{d} \left[\frac{\Lambda}{m} \right] \quad /20/$$

Zatem natężenie pola wewnątrz takiego solenoidu jest wielokrotnością liczby zwojów natężenia pola dla jednego zwoju płaskiego.

c/ Układ cewek kołowych

Pojedynczy solenoid w praktyce jest nieprzydatny, gdyż obszar w którym pole magnetyczne ma określone jednostajne natężenie, jest mały. Dlatego tworzy się układy kilku krótkich cewek umieszczonych w pewnej odległości od siebie i łączy się je w ten sposób, aby kierunki pól składowych tych cewek były zgodne, tzn. sumowały się. Wyrażenie na wartość natężenia pola takich zespołów cewek jest bardzo skomplikowane. W praktyce podaje się zwykle uproszczone wzory przeliczone przy zachowaniu odpowiednich założeń oo do wymiarów geometrycznych tych cewek.

Dla przypadku dwóch krótkich cewek umieszczonych od siebie w odległości a równej promieniowi $R = d/2$ tych cewek $a = R$, natężenie pola magnetycznego w środku wzdłuż osi układu wynosi:

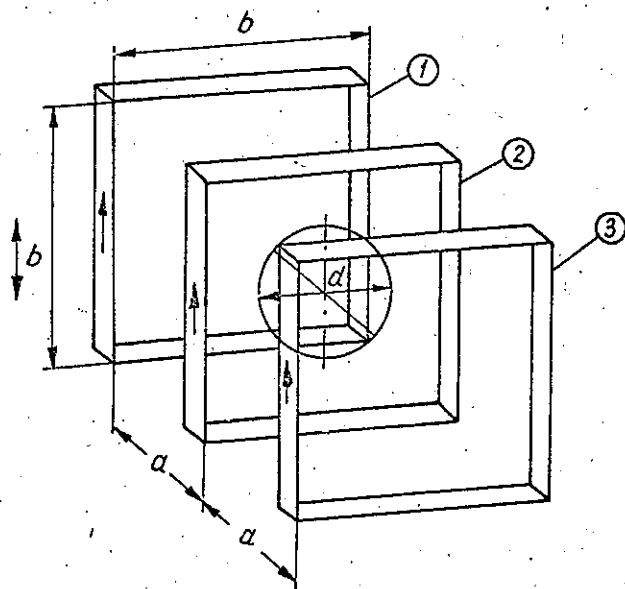
$$H = \frac{2 I \cdot n \cdot R^2}{2 [R^2 + R/2^2]^{3/2}} \approx 1,43 \frac{I \cdot n}{2R} = 1,43 \frac{I \cdot n}{d} \left[\frac{\Lambda}{m} \right] \quad /21/$$

gdzie: n jest liczbą zwojów jednej cewki.

Międzynarodowa organizacja IEC dla uzyskania jednorodnego pola zaleca [1] zastosowanie odpowiednio rozmieszczonych zwojów w postaci ram kwadratowych.

d/ Układ ram prostokątnych

Wykonanie cewek kołowych o dużych wymiarach jest bardzo kłopotliwe i dlatego w praktyce najczęściej stosuje się cewki w postaci ramy kwadratowej. Międzynarodowa organizacja IEC [1] dla wytworzenia jednorodnego pola zmiennego magnetycznego zaleca zestaw trzech cewek w postaci ram kwadratowych odpowiednio rozmieszczonych /rys. 1/.



Rys. 1. Zespół trzech ram /cewek/ do wytworzenia jednorodnego pola magnetycznego

Natężenie pola magnetycznego w środku wzdłuż osi takiego zespołu trzech cewek jest jednorodne i wynosi:

$$H = 1.69 \frac{i n_1}{b} \quad [\text{A/m}] \quad /22/$$

gdzie: b stanowi wymiar boku ramy - cewki.

Odległość pomiędzy cewkami wynosi:

$$a = 0.375 b \quad /23/$$

Obszar, w którym pole magnetyczne jest jednorodne ma średnicę d wzdłuż osi zespołu cewek, przy czym:

$$d = 0.5 b \quad /24/$$

Uzwojenie każdej cewki - ramy zewnętrznej /to zwoje cewki 1 i 3/ wynosi n_1 , zaś cewki wewnętrznej wynosi n_2 , przy czym pomiędzy liczbą zwojów n_1 i n_2 zachodzi następujący związek:

$$100 n_2 = 36 n_1 \quad /25/$$

3.2. Źródło jednorodnego zmiennego pola magnetycznego

Celem pracy jest wykonanie źródła jednorodnego zmiennego pola magnetycznego do badań właściwości aparatów słuchowych, pomiarów parametrów pętli indukcyjnych oraz badania odporności przyrządów pomiarowych na zakłócenia od pola magnetycznego itp. Źródło takie powinno spełniać następujące wymagania:

- mieć możliwość wytwarzania zmiennego pola magnetycznego o znanym natężeniu tego pola;
- przestrzeń pomiarowa, w której będą badane urządzenia, zespoły i podzespoły powinna posiadać wymiary $300 \times 300 \times 500$ mm;
- w obszarze pomiarowym pole magnetyczne powinno być jednorodne;
- mieć pożądaną wartość natężenia pola magnetycznego 4 A/m przy prądzie sterującym nie większym niż 10 mA i sygnale sinusoidalnym o częstotliwości 1000 Hz , zaś minimalna wartość natężenia pola możliwa do nastawienia powinna wynosić 10 mA/m ;
- osiągnąć zakres częstotliwości 50 do 5000 Hz ;
- charakterystyka częstotliwościowa pola magnetycznego w zakresie 50 Hz do 5000 Hz powinna być liniowa, z dokładnością $\pm 3 \text{ dB}$ względem 1000 Hz przy stałym poziomie napięcia sygnału sterującego;

- Źródło pola magnetycznego nie powinno zawierać jakiegokolwiek materiałów ferromagnetycznych.

W celu spełnienia powyższych wymagań najbardziej odpowiednim i łatwym w wykonaniu praktycznym wydaje się źródło w postaci trzech cewek - ram kwadratowych, zgodnie z zaleceniem IEC. Na podstawie powyższych wymagań oraz przyjęcia konstrukcji źródła w postaci zestawu trzech cewek można zaprojektować poszczególne cewki.

Przyjmując średnicę $d = 40$ cm obszaru, w którym natężenie pola magnetycznego jest jednorodne możemy wyliczyć bok poszczególnych ramy, wg zależności /24/:

$$b = 2 \cdot d = 80 \text{ cm}$$

Zatem wymiary zewnętrzne ramy wynoszą 80×80 cm.

Na podstawie zależności /23/ odległość pomiędzy ramami wynosi:

$$a = 0,375 b = 30 \text{ cm}$$

Na podstawie zależności /22/ można wyliczyć liczbę zwojów zewnętrznych cewek, a mianowicie:

$$n_1 = \frac{H}{1,69 i} \cdot b = 0,592 \frac{H}{i} b$$

Zakładając, że natężenie pola magnetycznego dla wartości prądu $i = 10$ mA winno wynosić $H = 4$ A/m otrzymujemy:

$$n_1 = 0,592 \frac{4}{0,01} 0,8 = 189,4 \text{ zw}$$

przyjmuje się $n_1 = \text{zw}$.

Na podstawie zależności /25/ liczba zwojów n_2 wynosi:

$$n_2 = \frac{36}{100} n_1 = 68,4 \text{ zw}$$

przyjmuje się 68 zw.

Znając parametry cewek można wyliczyć na podstawie wzoru /22/ natężenie pola magnetycznego zestawu cewek w zależności od prądu płynącego przez uzwojenia tych cewek, a mianowicie:

$$H = 1,69 \cdot \frac{190}{0,8} \cdot i = 400 \cdot i \quad [\text{A/m}]$$

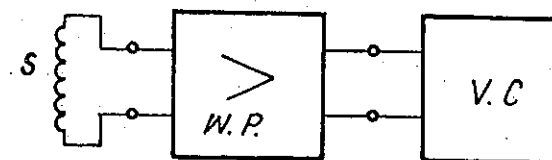
Przyjęto, że uzwojenie poszczególnych ram zostanie nawinięte drutem o średnicy 1,8 mm w izolacji emaliowej. Parametry cewek są następujące: indukcyjność cewek $L_1 = L_2 = 88$ mH; rezystancja $r = 4 \Omega$; indukcyjność cewki $L_2 = 13,3$ mH; rezystancja $1,5 \Omega$. Ponadto indukcyjność zespołu sprzężonych ze sobą trzech cewek $L_{\Sigma} = 210$ mH, rezystancja $r = 9,5 \Omega$.

Impedancja tego zespołu cewek wynosi: dla $f = 50$ Hz $Z_L' = 65 \Omega$, a dla $f = 1000$ Hz $Z_L'' = 1300 \Omega$.

4. POMIAR NATĘŻENIA POLA MAGNETYCZNEGO

W kraju brak jest odpowiedniej aparatury pomiarowej do pomiaru małych wartości natężenie zmiennego pola magnetycznego o częstotliwościach akustycznych. Stąd niemożliwe było przeprowadzenie badań wykonanego źródła pola magnetycznego. Dostępne mierniki pozwalają na pomiary natężenia pola o wartości powyżej 100 A/m. W tej sytuacji został wykonany model miernika natężenia pola własnej konstrukcji.

Na rys. 2 przedstawiono schemat blokowy miernika. Składa się on z sondy pomiarowej S, wzmacniacza pomiarowego WP oraz woltomierza z odczytem cyfrowym lub analogowym. Napięcie z sondy, która umieszczona jest w znanym polu magnetycznym, jest podawane na układ odciekający i wzmacniacz pomiarowy, a następnie na woltomierz. Wartość wskazanego napięcia odpowiada określonej wartości natężenia pola magnetycznego.



Rys. 2. Schemat blokowy miernika

4.1. Sonda pomiarowa

Jeśli w polu magnetycznym o strumieniu ϕ zostanie umieszczona prostopadle do strumienia cewka o liczbie zwojów N i powierzchni S , to pod wpływem zmian tego strumienia w cewce tej zaindukuje się napięcie e_i , które wyraża się wzorem [3]:

$$e_i = -N \frac{d\phi}{dt} \quad /26/$$

Uwzględniając zależność, że strumień magnetyczny $\phi = B \cdot S$ otrzymujemy:

$$e_i = -NS \frac{dB}{dt} = -K \frac{dB}{dt} \quad /27/$$

Całkując wyrażenie /27/ względem czasu t otrzymujemy wyrażenie na napięcie:

$$e_o = \int_0^t e_i dt = -K \int_0^B \frac{dB}{dt} dt = -KB \quad /28/$$

gdzie: współczynnik K jest parametrem cewki i ma wymiar zwój $\times m^2$.

Z zależności /28/ wynika jednoznacznie, że napięcie na cewce jest proporcjonalne do parametrów cewki, indukcji a tym samym natężenia pola magnetycznego, w którym się cewka znajduje oraz do częstości zmian tego pola, to znaczy od częstotliwości. Przy stałych parametrach cewki napięcie na jej wyjściu rośnie ze wzrostem częstotliwości zmian pola oraz jego natężenia.

Sonda pomiarowa może mieć różne wykonania w zależności od zastosowania. Do pomiaru natężenia pola magnetycznego zestawu cewek przedstawionego na rys. 1 publikacja IEC proponuje użycie sondy pomiarowej o wymiarach określonych zaleceniem IEC nr 268-1B. Konstrukcję takiej sondy przedstawiono na rys. 3.

Opierając się na wymiarach cewki /sondy/ można określić jej współczynnik K . Mianowicie na podstawie rys. 4 można podać funkcję uzwojenia cewki od jej promienia:

$$n(r) = N \frac{r - r_1}{r_2 - r_1} \quad \text{dla } r_1 < r < r_2 \quad /29/$$

podobnie powierzchnia cewki wynosi:

$$S(r) = \pi r^2 \quad /30/$$

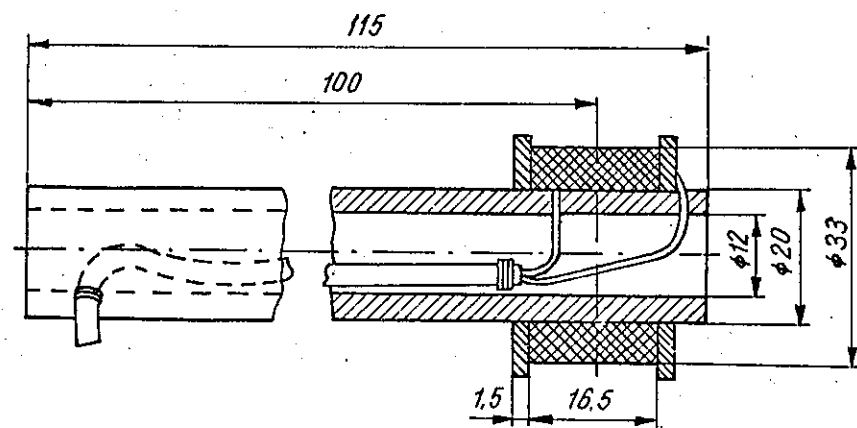
Wprowadzając zależności /29/ i /30/ do wzoru /27/ na indukowane napięcie e_i , otrzymamy:

$$\begin{aligned} e_i &= - \frac{dB}{dt} \int_{r_1}^{r_2} S(r) dn(r) = - \frac{dB}{dt} \int_{r_1}^{r_2} \frac{\pi r^2 N}{r_2 - r_1} dr = \\ &= - \frac{dB}{dt} \pi N \frac{r_2^3 - r_1^3}{3(r_2 - r_1)} = - \frac{dB}{dt} K \quad /31/ \end{aligned}$$

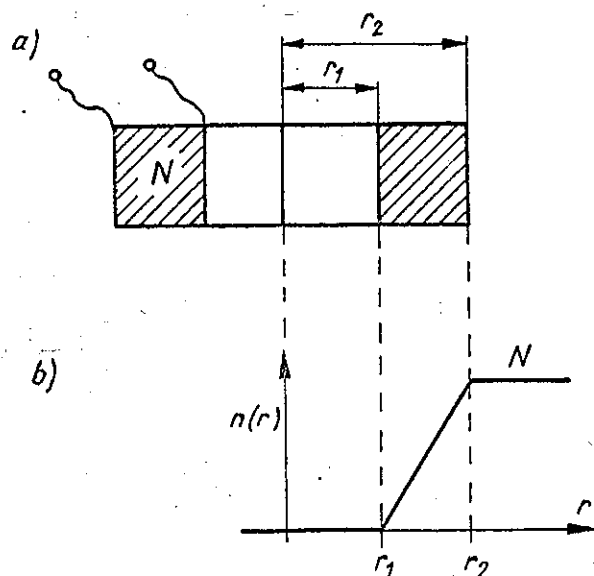
zatem:

$$K = \pi N \frac{r_2^3 - r_1^3}{3(r_2 - r_1)} \quad /32/$$

Inne parametry cewki - sondy oraz wymiary geometryczne można przyjąć na podstawie zalecenia IEC.



Rys. 3. Sonda pomiarowa wg IEC



Rys. 4. Sonda pomiarowa
a/ cewka; b/ funkcja uzwojenia

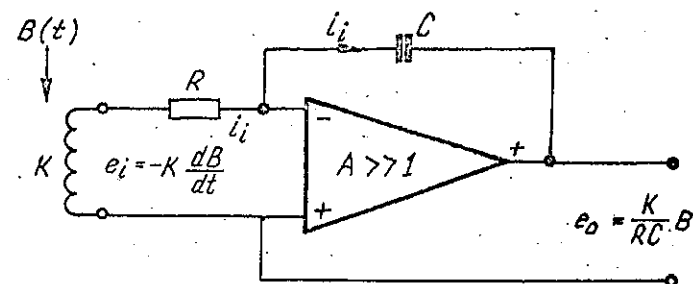
4.2. Wzmacniacz pomiarowy

Zgodnie ze wzorem /28/ napięcie indukowane na sondzie powinno być scałkowane. Operacji tej można dokonać za pomocą układu całkującego /rys. 5/. Z właściwości układu całkującego wg rys. 5 ze wzmacniaczem operacyjnym $A \gg 1$ napięcie na kondensatorze C wynosi:

$$e_o = \frac{1}{C} \int_0^t i_1 dt \quad /33/$$

Dla wzmacniacza operacyjnego impedancja wejściowa jest bardzo duża, zatem prąd wejściowy $i_1 = e_1/R$, więc:

$$e_o = \frac{1}{CR} \int_0^t e_1 dt = -e_o \quad /34/$$



Rys. 5. Wzmacniacz całkujący
 $R = 100 \text{ k}\Omega$, $C = 1,58 \text{ nF}$

Na wyjściu wzmacniacza operacyjnego pojawi się napięcie z przesuniętą fazą, gdyż wejście wzmacniacza jest odwracające. Porównując wzór /34/ ze wzorem /28/ otrzymujemy:

$$e_o = -\frac{1}{RC} (-KB) = \frac{K}{RC} B \quad /35/$$

Dla znanych wartości natężenia pola magnetycznego, a tym samym jego indukcji, znanych parametrów cewki oraz znanych wartości indukowanego napięcia na cewce można wyliczyć elementy RC układu całkującego.

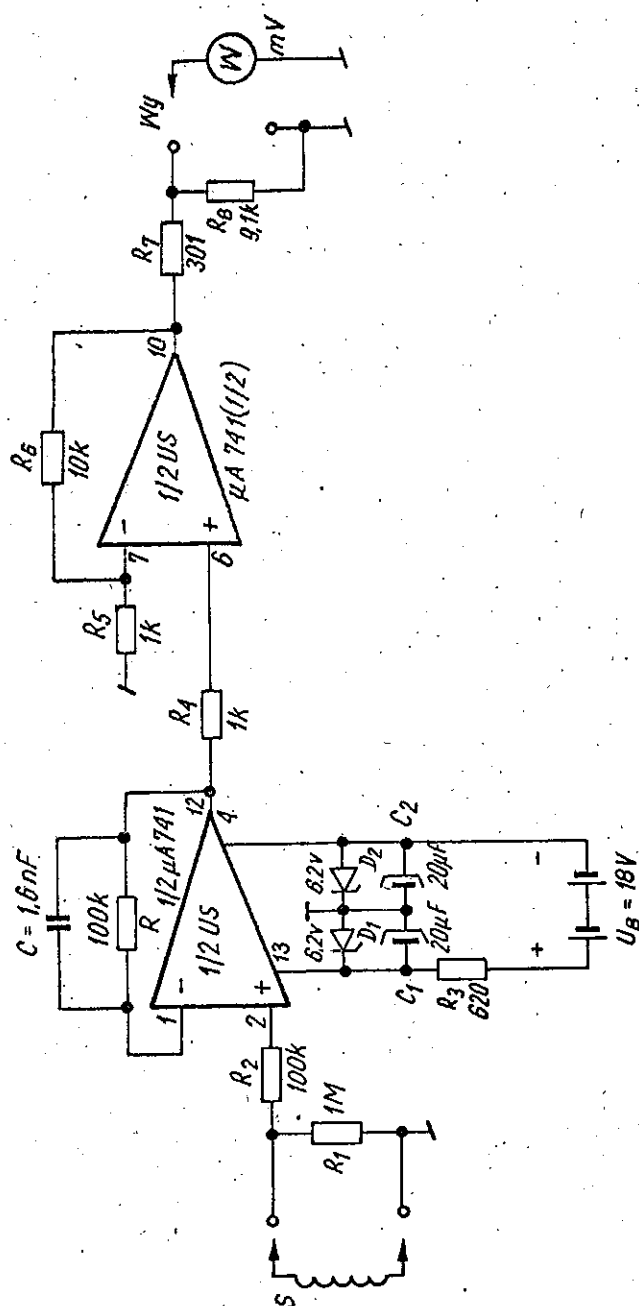
4.3. Układ miernika

Na rys. 6 przedstawiono układ miernika natężenia pola magnetycznego.

4.3.1. Sonda

Sondę przyjęto wg zaleceń IEC [1], której parametry konstrukcyjne są następujące:

- uzwojenie $n = 4500$ zw.
- średnica drutu $\phi = 0,13$
- rezystancja uzwojenia $r = 500 \Omega$
- wymiary przedstawia rys. 3.



Rys. 6. Miernik natężenia pola magnetycznego

Zgodnie z zaleceniem IEC [1] /IEC-268-1B/ umieszczenie zaproponowanej sondy wg rys. 3 w zmiennym polu magnetycznym o natężeniu 4 A/m przy częstotliwości 50 Hz spowoduje zaindukowanie w jej uzwojeniu napięcia o wartości równej 4 mV. Napięcie to jest proporcjonalne do natężenia pola oraz do częstotliwości zmian tego pola. Zatem przy częstotliwości 1000 Hz, wartość tego napięcia będzie 20 razy większa, to znaczy $e_o = 80$ mV.

4.3.2. Wzmacniacz pomiarowy

Na podstawie zależności /32/ oraz zależności /34/ można wyliczyć elementy RC układu odcinkowego. Wartość współczynnika K sondy na podstawie zależności /32/ ma wartość:

$$K = \pi N \frac{r_2^3 - r_1^3}{3(r_2 - r_1)} = 2,53$$

Dla przyjętej nominalnej wartości napięcia na sondzie $e_o = 80$ mV przy częstotliwości $f = 1000$ Hz, co ma miejsce dla natężenia pola 4 A/m, na podstawie zależności /34/ można wyliczyć RC, mianowicie:

$$RC = \frac{B \cdot K}{e_o} = 158 \cdot 10^{-6} \text{ om} \cdot \text{Farad}$$

Indukcję B, wyrażoną w jednostkach Tesla, można wyliczyć ze wzoru /1/ uwzględniając racjonalizowaną postać μ_o , a mianowicie:

$$B = \mu_o H = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot H \text{ [T]}$$

$$B = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 4 = 5 \mu\text{T}$$

Przyjmując wartość rezystora $R = 100 \text{ k}\Omega$, możemy wyliczyć pojemność kondensatora C, tzn.:

$$C = \frac{158 \cdot 10^{-6}}{R} \approx 1,6 \text{ nF}$$

Pierwszym stopniem wzmacniacza pomiarowego jest układ całkujący w postaci wtórnika, którego wzmożenie wynosi $K = 1 \text{ v/v}$. W celu uzyskania odpowiednio większej wartości napięcia przy ustalonych parametrach sondy przyjęto wzmożenie wzmacniacza pomiarowego $K = 10 \text{ v/v}$. Rolę tę spełnia drugi stopień wzmacniacza z ujemnym sprzężeniem zwrotnym ustalającym pożądane wzmożenie. Wzmacniacz został wykonany na układzie scalonym typu $\mu A741$. Ma zasilanie bateryjne 18 V, co zabezpiecza układ przed zakłóceniami od sieci 50 Hz.

4.3.3. Woltomierz

Jako wskaźnik użyto zewnętrzny miernik napięcia, który może być wyskalowany w jednostkach natężenia pola tzn. w A/m.

Zgodnie z zaleceniem IEC umieszczenie sondy w polu magnetycznym o natężeniu 4 A/m i częstotliwości 50 Hz powoduje zaindukowanie na zaciskach sondy napięcie o wartości 4 mV, co na wyjściu wzmacniacza pomiarowego odpowiada napięciu 40 mV. Na tej podstawie można wyskalować miernik napięcia.

5. ZAKOŃCZENIE

Wyniki wstępnych pomiarów potwierdzają prawidłowość przyjętej koncepcji rozwiązania układu. Dla sygnału przy częstotliwości 50 Hz i natężeniu prądu $i = 10 \text{ mA}$ na wyjściu wzmacniacza pomiarowego wystąpiło napięcie $U_{wy} = 40 \text{ mV}$, co odpowiada napięciu na sondzie $U_s = 4 \text{ mV}$. Zgodnie z zaleceniem IEC wartość napięcia 4 mV na sondzie wykonanej odpowiednio do zaleceń przy częstotliwości 50 Hz występuje przy natężeniu pola magnetycznego 4 A/m. Jednakże dla ostatecznej oceny należy wykonać dokładne badania w pełnym zakresie zmian częstotliwości i zmian wartości natężenia pola magnetycznego. Pozwoli to na wyskalowanie miernika oraz dokładne określenie parametrów źródła pola magnetycznego. Brak odpowiedniej aparatury pomiarowej w kraju zmusza do wykonania wielu pomiarów pośrednich.

Wyniki pomiarów oraz ich analiza zostaną przedstawione w jednym z następnych zeszytów Referatów Problemowych IL.

WYKAZ LITERATURY

1. Zalecenia IEC 118-1 do 118-4 oraz 286B.
2. Zalecenie CCITT, t.V, P.37.
3. Kurdziel R.: Podstawy elektrotechniki. WNT, Warszawa 1973.
4. Matusiak R.: Elektrotechnika teoretyczna. WNT, Warszawa 1982.

BIBLIOTEKA
Instytutu Łączności
Nr S-9769

Biblioteka

IL

S-9769